

# ISO 7039 金属材料-引張試験-中空試験片内の高圧ガスの影響に対する材料の感受性を評価する方法— 高圧水素の引張特性への影響を簡便に評価する方法の概要

緒形俊夫(国立研究開発法人 物質・材料研究機構 名誉研究員), 小野 嘉則(国立研究開発法人 物質・材料研究機構 技術開発・共用部門 材料データプラットフォーム 極限環境材料データユニット)

## はじめに

日本から提案した, 中空試験片を用いた簡便な高圧水素中の材料試験法の ISO 7039 が 2024 年 7 月 22 日に出版された。本試験法により 1000 気圧の水素環境中のみならず, 様々なガス環境や温度/圧力の試験条件での材料特性評価が可能になり, 利用機器の安全性と信頼性向上に役立つと期待されている。

カーボンニュートラルの水素をエネルギーとして利用するためには, 水素の製造, 輸送, 貯蔵, 利用に関わる機器のコストを下げることで, ならびに水素中で材料に負荷すると強度や延性の特性が低下する場合があること等が課題である。水素の材料特性への影響を評価する従来の高圧(100 MPa, 1000 気圧)水素環境下の材料試験法は, 図 1 に示すように高圧水素容器内に試験片を置いて試験を行うため, 設備が高価かつ実施が容易ではなく, 限られた試験機関にしか試験装置がなく, 高圧容器内の試験片の温度は変え難かった。水素エネルギー利用の一つである燃料電池車への水素の充填時には, 高圧水素ガスを予冷却することや液化水素を急速気化し高圧水素を充填する方法が検討された。しかし, 従来の試験法では低温でのシールが難しく高圧水素環境下での材料特性取得は困難なので新たな評価法開発の要請があった。

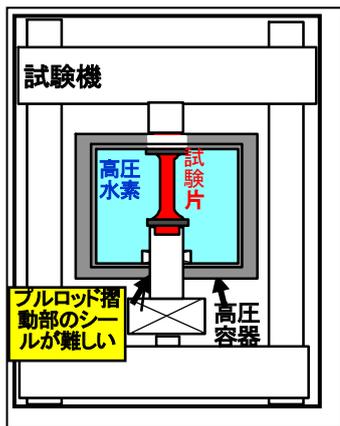


図1 従来の高圧水素環境下の材料試験法

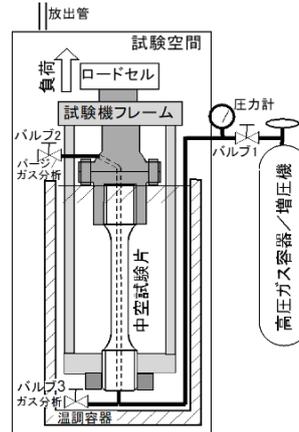


図2 ISO 7039 中空試験片による高圧水素環境試験法

- ・ポンペ圧(15MPa)迄は昇圧機が不要で, 圧力計・バルブ・配管・継手と試験空間があれば良い。試験機はチャンバーに入ると良い。
- ・1 MPa 未満であれば高圧ガス保安法の対象外。
- ・1 MPa 未満でも材料のスクリーニングに有効。
- ・試験片内と封じた配管内の容積が 1 cm<sup>3</sup> 以下なら使用ガス量は 100 MPa でも大気圧で僅か1 ℓの風船程度。

そこで 2005 年に, 図2に示すような丸棒試験片の中心部に細孔を加工した中空試験片を用いて, 中空部に高圧水素を封入して機械試験を行う方法を開発した<sup>1)</sup>。これは丸棒試験片に細孔を加工し, そこに熱電対を挿入して極低温での機械試験中の試験片内温度を測定する手法<sup>2)</sup>を応用したものである。本試験法の利点は, 高圧容器が不要でコストが安いだけでなく, 高圧容器と荷重負荷ロード(プルロッド)間の硬いシールが不要なため, 低温から高温までの高圧水素環境中試験が容易なことである。

本試験法は, 主に引張試験や疲労試験を行うが, 得られた結果は従来の中実試験片を高圧容器内で試験した結果と同様な結果が得られている。一例として図3<sup>3),4)</sup>に複数のオーステナイト系ステンレス鋼に

ついて, 中空試験片を用いて高圧水素環境中の低ひずみ速度引張試験で得られた相対絞りの温度依存性を示す。相対絞りは, 水素ガス環境中で得られた「絞り」を不活性ガス環境中で得られた「絞り」で除した値であり, その温度依存性は中実式の相対絞り<sup>5)</sup>とはほぼ同じである。

筆者の緒形は中空試験法を用いて, 様々な水素利用機器用構造材料の候補材料について, 室温から極低温までの引張試験と疲労試験を実施し, 得られたデータを発表するとともに<sup>3)-11)</sup>, 「bcc 相が多少あっても或いは新

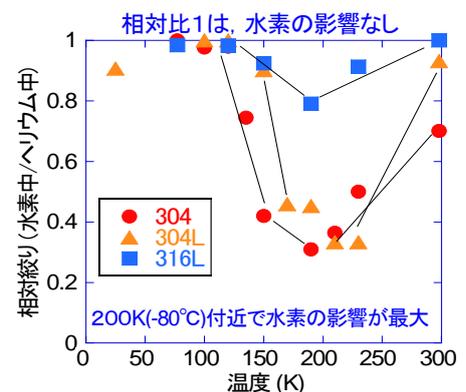


図3 SU304, 304L, 316L の 25-300 K, 13 MPa 水素中の相対絞り

たに生じなければ水素の影響は無い、300 MPa 以上の繰返し引張応力で疲労特性が水素の影響で劣化する可能性があり 500 MPa を超えると可能性が高くなり、高強度材料を高圧水素環境で使用する際には、ガス環境や設計応力に表面性状を考慮した実環境での疲労試験のデータも確認する必要がある」という目安を示している<sup>5)</sup>。

また、中空試験法で得られたデータは、製造した圧力機器について高圧ガス保安協会の特認を得るためや、一般高圧ガス保安規則関係例示基準の元データとして使われ<sup>12)</sup>、水素適合性材料の認定にも使われている。さらに中空試験法は、国内の民間の試験機関や海外でも実施されていて、中空試験法を始めたい企業からも標準化の要望が高まり 2017 年から標準化に向けた活動を始めた。試験法の概要と標準化の経緯について紹介する。

ISO7039 中空試験法の主な概要(従来の引張試験法と異なる点、項目番号は ISO 7039 の項目番号)

## 1 適用範囲

この規格は、高圧ガス媒体で満たされた金属材料の中空試験片の内面の形状と提案された仕上げ手順を規定する。この規格は、高圧不活性ガスまたは空気と比較した高圧ガス媒体の影響を評価するための引張試験手順を規定する。注記 温度範囲と圧力範囲は、試験する材料と使用する試験ガスによって異なる。

## 3 用語及び定義

### 3.1 中空試験片

丸棒試験片の中心軸に沿って細孔を加工した試験片

### 3.2 中空試験片による破断後の相対伸び、 $A_{h(rel)}$ 《従来は REL (Relative または Ratio of Elongation) が慣用》

中空部に高圧ガス媒体を封じて得られた破断後の伸びを、中空部に大気環境または高圧不活性ガス環境をつくって得られた破断後の伸びで除した値

### 3.3 中空試験片による相対絞り $Z_{h(rel)}$ 《従来は RRA (Relative または Ratio of Reduction of Area) が慣用》

中空部に高圧ガス媒体を封じて得られた漏洩時の面積減少率を、中空部に大気環境または高圧不活性ガス環境をつくって得られた面積減少率で除した値

### 3.4 中空試験片による相対 0.2% 耐力 $R_{p0.2h(rel)}$ 《従来は RPS (Relative または Ratio of Proof Stress) が慣用》

中空部に高圧ガス媒体を封じて得られた 0.2% 耐力を、中空部に大気環境または高圧不活性ガスをつくって得られた 0.2% 耐力で除した値

### 3.5 中空試験片による相対引張強さ $R_{mh(rel)}$ 《従来は RTS (Relative または Ratio of Tensile Strength) が慣用》

中空部に高圧ガス媒体を封じ手得られた引張強さを、中空部に大気環境または高圧不活性ガスをつくって得られた引張強さで割った値

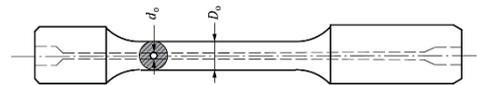


図 4 ISO 7039 Figure 1 に示す中空試験片の概略図

## 6 試験片

### 6.2 形状と寸法

試験片の平行部分の外径 ( $D_o$ ) は 3 mm ~ 12 mm の範囲内とし、平行部の穴の推奨内径 ( $d_o$ ) は 1 mm ~ 4 mm の範囲内とする。 $d_o/D_o$  比は 0.33 未満が推奨される。 $d_o/D_o$  比は当事者間で合意できる。

### 6.3 穴の内面

ドリル加工や放電加工によって生じた内面の加工層や熱影響層を取り除かなければならない。

内面粗さ  $R_a$  は 0.25  $\mu\text{m}$  以下が推奨される。測定値または推定値を報告しなければならない。非貫通試験片については、当事者間の合意に従って予備試験で機械加工および研磨工程を検証する必要がある。

## 10.1 試験ガス

中空試験片で試験を行うには、試験ガスと不活性ガスの 2 つのガスを使用しなければならない。試験ガス(適切な安全対策を講じたもの)は、たとえば、水素、硫化水素、腐食性ガス、アンモニウムガス、または二酸化炭素ガスのいずれかで良い。不活性ガスは、高圧状態での参照用およびページ用のヘリウム、アルゴン、または窒素のいずれかで良い。

試験片は、系内から空気を除去するために、不活性ガスで少なくとも 3 回ページまたは真空ポンプ引きしなければならない。不活性ガスを置換するために、試験ガスにより 3 回ページを実施しなければならない。試験ガスの純度または品質は重要な試験パラメータであり、当事者間によって定義され、報告される必要がある。

水素環境では、水素の影響は不純物に非常に敏感であるため、99.9999%以上の濃度の水素を使用する必要があります。当事者間の合意に従って、他のガス品質を使用しても良い。ガス品質は、少なくとも水素濃度と酸素(O<sub>2</sub>)および水蒸気(H<sub>2</sub>O)の含有量を含めて、試験報告書に記載しなければならない。

## 10.4 試験速度

試験速度は、平行部長さにわたる推定ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_t$  で  $0.00005 \text{ s}^{-1}$  以下でなければならない。

### 11.1 中空試験片を用いた試験で取得した降伏強さ、引張強さ、破断後伸び

最終破断前に中空内の試験ガスがリークした場合は、記録された応力-変位曲線またはガス圧-変位曲線からガスがリークした変位を特定する。最終破断前後の変位の差は、破断後の最終ゲージ長 ( $L_f$ ) から差し引く。中空試験片を用いた破断後の伸び率 ( $A_h$ ) の計算には、変位の塑性変形部分のみを考慮する。この方法の適用については、試験報告書に報告しなければならない。

### 11.2 リーク時の絞り

リーク時の絞り ( $Z_h$ ) は、式(1)によって計算される:

$$Z_h = \frac{(S_o - S_f)}{S_o} \times 100 = \frac{(D_o^2 - d_o^2) - (D_f^2 - d_f^2)}{D_o^2 - d_o^2} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $S_o$  試験前の断面積、 $S_f$  リーク時の最終断面積

$D_f$  破断後の破断部の外径

最終破断前に中空部の試験ガスが放出され、破断部の外径が楕円形である場合は、破断部の外径の最大値を測定し、 $D_f$  に用いる。亀裂が表面に達し、ガスがリークした時点での  $Z_h$  を評価するために、上記の説明に従って  $D_f$  を測定する。

$d_f$  破断後の破断部の中空部内径

### 中空試験法の ISO 提案

表1に中空引張試験法の ISO 提案の経緯を示す。中空試験法は、中空内に高圧水素を封入するだけでなく、様々な腐食ガスを封入することも可能な一般的な材料試験法と考え、提案先として ISO/TC 164(金属の機械試験)を選んだ。TC 164には SC 1(単軸試験)、SC 2(延性試験)、SC 3(硬さ試験)、SC 4(靱性試験・疲労試験)があり、引張試験やクリープ試験等を所掌する SC 1を選んだ。提案時の表題が「中空試験片高圧水素中低ひずみ速度引張法」だったので、SC 1での提案説明の際には、水素関連の他の TC の「鉄鋼」や「水素」の方が良いのではという意見もあったが、TC 164/SC1で新規提案手続きに進むことにした。なお今回の提案は特例的で、個人提案を日本規格協会の ISO TC 164 運営委員会に承認して頂いた形になっている。

### SC 1/WG 9(水素中の中空引張試験)での議論

2020年10月の SC 1での提案説明の前に、各国の高圧水素適合材料関係者に協力依頼のメールを送ったが、米国は当初から反対であった。主な理由は、当時の日本では2000年頃からデータが蓄積されていた水素中の引張

表1 中空試験片引張試験法の ISO 提案の経緯

年/月	出来事
2017/08	ISO/TC 164(金属材料の機械的試験)事務局の日本規格協会に、中空引張試験片法を提案
2017/11	TC 164での提案が経済産業省国際標準課で了解。中空試験法を検証するため提案は3年後
2018/03	日本規格協会の ISO TC 164 運営委員会において、2020年度に提案予定の試験法として了解
2020/09	ISOの新規提案の投票において、WGのエキスパートを負担して賛成する国が5か国以上必須なため、米・中・韓・独・仏・英・伊の高圧水素適合材料関係者に協力依頼メールを送る。米国は当初、反対。中国は、極低温材料関係者に依頼
2020/10	TC 164/SC 1 会議で提案説明し、新規提案文書(Form04と原案)を SC 1事務局(仏)に提出
2021/02	新規提案 NP 7039 の投票開始
2021/05	投票終了(賛成:12カ国、反対:米国、棄権:9カ国、エキスパート国(日、独、英、韓、中)で採択)
2021/09	ISO/TC 164/SC 1/WG 9(水素中の中空引張試験)が正式に発足、設置期間は3年間、コンビナートと secretary を務める
2021/12	第1回 ISO/TC 164/SC 1/WG 9を Web 開催し WD を改訂し 2022年2月迄にコメントを求めた
2022/09	第2回 WG 9を Web 開催し WD を再改訂した
2022/12	CD7039の投票(Consultation)が始まる(8週間)
2023/01	CD投票終了。Approved
2023/03	第3回 WG 9を Web 開催し CD を再改訂した
2023/06	第4回 WG 9を Web 開催し DIS 案を検討した
2023/10	DIS7039の投票が始まる(12週間)
2024/01	DIS投票終了。Approved
2024/02	第5回 WG 9を Web 開催し FDIS 案を検討した
2024/05	FDIS7039の投票が始まる(8週間)
2024/07	FDIS投票終了。Approved
2024/07	ISO 7039 発行

試験で得られた「相対絞り」を水素適合材料選択の主要な特性としていたが、米国は、

- ① 水素適合性の引張特性での評価は誤解が生じ易く、引張特性で材料選定をしている規格は無く、压力容器にした時のき裂進展を考慮した使用限界を決めるのに破壊靱性値の  $K_{IH}$  が必要、
- ② 水素中の引張試験規格は中実試験片の ASTM G 142 や ISO 11114 - 4 があるので新たな規格は必要ない、
- ③ 水素適合性材料の選択が喫緊の課題なので、スクリーニングにさえれば良い、

という意見で、メールでの議論の後、中空試験片と③の価値を米国にも認めて貰って提案説明から新規提案 NP 投票に進んだが、米国だけが反対票で、エキスパートも出ず積極的賛成 5 か国でギリギリの採択であった。

第 1 回 WG を 2021 年 12 月に Web 会議で開催したが、米国からも 2 名のエキスパートが参加し、中国から 5 名、ドイツから 8 名、日本から 3 名、ベルギーとフランスと韓国と英国から 1 名ずつで、8 か国から 22 名が参加した。

第 1 回 WG での主な議論は上記の①②③の続きで、以下のように本試験法を、材料の水素適合性評価のスクリーニング試験に固執する意見が多かった。

- ④ スクリーニングなら価値があるのでスコープや本文に明記すること。この原案は試験法と言いながら選定法を匂わせている。

また以下の意見もあり、

- ⑤ 従来法の中実試験片の結果との一致は必須ではない、
- ⑥ 簡単に融通が利く方が良い。真空(ターボ)ポンプは高価なので含めないで欲しい。

これらの議論の後に以下の Resolution を採択した。

- 1) WG メンバーは、ISO/AWI 7039 の CD 案を投票のために 6 月前までに SC1 に提出する、
- 2) 清書版の改訂した WD を 2021 年末までに配布し、コメントを 2022 年 2 月末までに返す。

2022 年 2 月末までに膨大な数のコメントが届くが、「水素中」という題目からスクリーニングに拘る修正が多く、対応に時間が掛かった。結局、スクリーニングは TC164 が所掌する規格の中で使った前例がない事から、スクリーニングを使用しなくて済むように、また水素以外のガスの評価にも使えるように、「水素中」という語を省いた。

第 2 回 WG を 2022 年 9 月に開催した。WD (作業原案) の本文の議論だけでなく表題も改訂し、「Tensile testing — Method for evaluating changes of properties in a high-pressure gaseous environment using hollow test piece」とすることとした。WG での議論及び追加のコメントを反映した WD を CD (委員会原案) にする CD Consultation 投票に進むことが合意され投票が行われたが、ISO の標準化のスケジュールは 3 カ月遅れであった。

第 3 回 WG を 2023 年 3 月に開催した。主な議論は以下の通りである。

#### 1) 表題

高圧水素だけでなく腐食性ガスや可燃性ガスも含めるという試験ガス環境に関する議論に伴い、「中空試験片内の高圧ガスの影響に対する材料の感受性を評価する方法」に再変更された。

#### 2) 試験片の形状

これまでは主に穴が貫通している試験片について議論されてきたが、非貫通試験片も含めることが提案された。議論の結果、貫通している試験片を標準とするが会議後、非貫通試験片もオプションとして許可されることにした。

#### 3) 試験片の寸法

試験片平行部の外径 ( $D_o$ ) と中空の内径 ( $d_o$ ) の範囲を、機械加工のコストのために大きくすることが提案され、当初  $D_o$  と  $d_o$  の範囲は夫々 4 mm ~ 8 mm と 1 mm ~ 2 mm だったが、3 mm ~ 12 mm と 1 mm ~ 4 mm になった。

#### 4) 穴の偏心率

中空試験片の穴の加工精度の総振れ許容差が提案され「平行部長さにわたって 0.05 mm 以内」が追加された。

#### 5) 内面仕上げ粗さ

内面仕上げ粗さが議論され、水素ガス環境試験用の中実試験片と同じ値として 0.25  $\mu$  m 未満が合意された。

#### 6) 試験ガス

会議での議論と会議後の追加コメントにより、この条項は発行された ISO 7039の記述のように変更された。

第4回 WG を 2023 年 6 月に開催した。主な議論は以下の通りである。

#### 1) INTRODUCTION

パラグラフ 2 の最後の行「この方法は、水素ガス中の金属材料を評価するための材料スクリーニング法とみなされており、得られたデータは設計データまたはエンジニアリングデータとして使用してはならない」という CD rev. 1.3 の記述は、試験速度が ISO 6892 よりも遅いこと、得られた耐力または引張強度が ISO 6892 で取得され設計データベースに使用されるデータと異なるという議論の結果、この文章は「この方法は、水素ガス中の金属材料を評価するための材料スクリーニングとみなされており、得られたデータは設計に使用してはならない」と修正された。

#### 2) 記号と定義の $R_{p0.2h}$ , $R_{mh}$

上記議論の結果、この方法で中空試験片を用いて得られたデータを区別するために、耐力 ( $R_{p0.2}$ ) または引張強度 ( $R_m$ ) の後に接尾字「h」が追加された。次に、 $RR_{p0.2h}$  および  $RR_{mh}$  の後に「中空試験片による」が追加された。

#### 3) 6.2 中空内面粗さ

「内面および外面は、サンプルの特性に影響を与えないように準備されなければならない。穴あけや放電加工によって内面に熱影響層が生じた場合は、機械的な方法で除去しなければならない」という内容が合意された。

#### 4) 9.1 安全要求

この文の位置はコメント (WG 9 N 48 文書) に従って注記に移動されたが、議論後に本文内に再配置された。

以上の議論とコメントを反映した DIS (国際標準案) を SC 1 事務局に提出し DIS 投票に進むことが合意された。  
・2023 年 11 月に日本国内で中空試験を実施している機関と関係者にも DIS を配布しコメントを求めた。中空内粗さやガス分析に関する要求内容の緩和を始め、多くのコメントが寄せられ、幾つかを DIS 投票での日本からのコメントの中に加えた。コンビナーは WG 内の合意を図る中立の立場なので、これまで合意されて来た要求事項の変更には、根拠となるコメント表へのエキスパート国としての意見の記載が必要だった。

第5回 WG を 2024 年 2 月に開催した。主な議論は、

#### 1) INTRODUCTION

序文に要求事項を含めてはならないという ISO 中央事務局からのコメントに従い、パラグラフ 2 の最後の行「得られたデータは設計に使用してはならない」を「得られたデータは設計に適していない」に変更した。

#### 2) Scope

注 2 の 2 番目の文を本文に含めた。

#### 3) 6.1-6.2 試験片

許可には「may」、可能性には「can」を使用するというコメントに従って、「may」または「can」の使用が修正された。

#### 4) 6.3 試験片 NOTE 2

ASTM G 142 の表面粗さは  $Ra$  ではなく  $RMS$  であるというコメントに従って、注記 2 が削除され、「内面粗さ  $Ra$  は  $0.25 \mu m$  以上の表面仕上げが推奨され、少なくとも推定される必要がある」が本文に含まれた。

#### 5) 9.1 安全要求

ISO 規格には法律を遵守するための明確な要件が含まれていないという ISO 中央事務局からのコメントに従って、パラグラフ 2 は「安全要件はこの図には示されていない。圧力システムの導入に関する関連する現地の安全規制、規則、基準を参照するのはユーザーの責任である」と修正された。

#### 6) 10.1 試験ガス

第 4 項は「水素環境では、水素の影響は不純物に非常に敏感であるため、99.9999%以上の濃度の水素を使用する必要がある。当事者間の合意に従って、他のガス品質を使用できる。ガス品質は、少なくとも水素濃度と酸素および水蒸気の含有量を含めて、試験報告書に記載する必要がある」と修正された。

#### 7) 10.2 試験温度

「この規格では高温または低温試験の実施方法については何も述べられていないため、将来的に検討する必要がある」というコメントについて議論し、今後のこの規格の改訂時に改めて議論することが合意された。

#### 8) 11.1 中空試験片による降伏強度, 引張強さ, 破断伸び

「漏れ時の伸び率の計算を示す図を追加する」というコメントは、将来の改訂時に再度議論することが合意された。

#### 9) 11.2 ガスがリークした時の絞り

「記述を変更することを提案する」というコメントについては、将来の改訂時に再度議論されること合意された。

#### 10) 記号の変更

ISO 中央事務局のコメントで、ISO/IEC Directives, Part 2, 2021, 27.5「特性番号などの例外的な場合を除き、変数は1文字の記号でなければならない」により、ISO 6892-1-2016の記号  $S_{m(rel)}$ 「傾きの相対標準偏差」を参考に、相対伸び, 相対絞り, 相対降伏強度, 相対引張強さの記号を,  $A_{h(rel)}$ ,  $Z_{h(rel)}$ ,  $R_{p0.2h(rel)}$ ,  $R_{mh(rel)}$ にそれぞれ変更した。

以上の議論とコメントを反映した FDIS (最終国際標準案) を SC 1事務局に提出し、FDIS 投票に進み、2024年5月から7月まで8週間の FDIS 投票が行われた。

FDIS 投票において、幾つかのコメントが寄せられて、表記上の不具合についてはISO 中央事務局によって修正されたが、語の挿入や削除等については次回のレビューの時に検討するとされ変更されなかった。コンビナーと SC 1事務局がこの結果を確認し、出版プロセスに進み、2024年7月22日に出版された。

## おわりに

本試験法は、高圧水素ガス中の構造材料の引張特性を高圧容器を使わずに試験片内の小さな穴に少量の高圧水素ガスを封入するだけで簡単に同等の評価が出来るという方法で、20年前から著者の緒形が一人で楽しんでいましたが、多くの人が使いたいという事で、試験法の標準化(規格化)を始めました。

当初 WD の題目は「中空試験片による水素中の引張試験法」で、2021年9月に WG が発足して以来、日本時間では深夜の Web 会議でした。WG での議論は5回ともかなり紛糾しましたが、NBS に1年間滞在時の知人や多くの関係者のご協力のおかげで、何とか妥協しコンセンサスが得られました。最後の最後で定められた記号の相対伸び, 相対絞り, 相対降伏強度, 相対引張強さの記号は、今後の学会発表や論文にも使われると思います。

中空試験片法により、従来法では不可能だった高温や極低温での高圧水素環境中試験も可能となり、引張試験だけでなく中空高温クリープ試験, 中空疲労試験も普及して、より多くの材料特性データが容易に得られるようになり、また最高荷重点後は応力の高い中心軸に環境の界面があり、水素等に対し厳しめのデータが得られることは機械的特性試験の革命とも言え、構造材料の信頼性の向上と材料の強度と破壊の理解が進み、さらに疲労強度や遅れ破壊強度より数倍高い値の引張強度とは何かを見直すことに発展すれば良いと期待しています。

## 文 献

- 1) 緒形俊夫: 日本金属学会誌, **72**, 125-131 (2008).
- 2) 緒形俊夫, 他: 鉄と鋼, **73**, 160-166 (1987).
- 3) T. Ogata, Hydrogen Embrittlement Evaluation in Tensile Properties of Stainless Steels at Cryogenic Temperatures, *Advances in Cryogenic Engineering*, 54, 3, 124-131, (2008)
- 4) 緒形俊夫: 簡便な水素環境試験法によるステンレス鋼の低温での特性評価, 圧力技術, 46, 4, 200-204, (2008)
- 5) 福山誠司, 他: 金属学会誌, **67**, 456-459 (2003)
- 6) 緒形俊夫, JRCM NEWS, No.346, (2015年8月).
- 7) 緒形俊夫: 高圧水素ガス環境中の簡便な材料評価技術, 緒形俊夫, 水素利用技術集成 vol.5, NTS, (2018)
- 8) T. Ogata, Hydrogen Environment Embrittlement on Austenitic Stainless Steels from Room Temperature to Low Temperatures, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 102 (2015) 012005
- 9) T. Ogata, Simple Mechanical Testing Method to Evaluate Influence of High Pressure Hydrogen Gas, ASME PVP2018-84187

- 10) T. Ogata, Influence of 70 MPa Hydrogen Gas on SUS 630 from 77 K to 373 K by Simple Testing Method, ASME PVP2018-84462
- 11) Toshio Ogata and Yoshinori Ono, Influence of Roughness of Inner Surface of Simple Mechanical Testing Method to Evaluate Influence of High Pressure Hydrogen Gas, ASME PVP 2019-93492
- 12) 辻上 博司, 遠藤 暁子, 緒形 俊夫, 中村 潤, 高林 宏之: 液化水素ポンプ昇圧型水素ステーション用高強度材料の水素適合性・低温靱性評価, 圧力技術, 55, 6, 312-318 (2017)

#### 参考情報

ドイツの試験機メーカーのツビックローエル社の中空試験片技術を使用した圧縮水素環境での試験

<https://www.zwickroell.com/ja/industries/energy/hollow-specimen-testing-under-compressed-hydrogen/>

ドイツのブラウンホーファー研究所の中空試験紹介動画

<https://www.youtube.com/watch?v=X-fZsCNxqbE>